

黄土高原西北部春小麦集雨微灌的产量及水分效应

蔺海明¹, 张志山², 谢忠奎²

(1. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:为探讨集雨微灌对春小麦的产量及水分效应, 于 2001 年在黄土高原西北部的甘肃省皋兰县进行了灌水方式(管灌、滴灌和微喷灌 3 个水平)和灌水量(0mm、22.5mm、45.0mm 和 67.5mm 4 个水平)2 因素试验, 分别在拔节期、孕穗期和开花前期灌水, 试验共设 36 个小区, 小区面积 $3 \times 5 \text{m}^2$ 。试验结果表明: 小麦生育期土壤水分变化动态受降水量、灌水量和小麦生育期耗水量的影响, 总体呈下降趋势。微喷灌处理能显著地增加上层(0~40cm)土壤含水量, 以微喷灌 67.5mm 处理最为明显。对产量的方差分析结果表明, 尽管灌水方式间的差异不显著, 但从产量表现来看, 其大小顺序依次是微喷灌、滴灌、管灌和对照; 灌水量和互作间的差异达极显著水平; 灌水有增加公顷穗数, 降低穗粒数和千粒重的趋势; 随灌水量的增加, 千粒重对产量的贡献减小, 而公顷穗数对产量的贡献增加, 穗粒数对产量的贡献表现在这一过程之中。作物田间耗水量和水分利用效率随补灌量的增加而增加; 以微喷灌 67.5mm 的水分利用效率最高; 供水效率以微喷灌 45.0mm 和 67.5mm 处理为高。

关键词:黄土高原, 集雨微灌, 春小麦, 产量, 水分利用效率

Effect of micro-irrigation with rainwater catchment on the yield and water use efficiency of spring wheat in the northwest of the Loess Plateau

LIN Hai-Ming¹, ZHANG Zhi-Shan¹, XIE Zhong-Kui² (1. Gansu Agricultural University, Lanzhou, 730070, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou, 730000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 620~622.

Abstract: Aid-to-irrigation with rainwater catchment is an efficient measure to assure the stability and high-yield of crop production in the arid or semi-arid regions, especially on the Loess Plateau of northern China. In recent years, the researches relative to the issue focus on the determination of the aid-to-irrigation system with rainwater catchment. The present study was conducted in field plots at the northwest of the Loess Plateau to evaluate the effect of micro-irrigation with rainwater catchment on the yield and water use efficiency (WUE) of spring wheat. In the field experiment, 36 field plots with each area of $15 \text{m}^2 (3 \times 5 \text{m}^2)$ were established and treated with two factors of irrigation method and amount of irrigation. The irrigation method as the main-treatment factor was set up with three treatments (pipe-irrigation, drip-irrigation and micro-sprinkle-irrigation). The amount of water as the sub-treatment factor

基金项目:中国科学院“西部之光”项目暨甘肃省中青年科学基金资助项目(ZSPPI-A21-032)

收稿日期:2002-04-14; **修订日期:**2002-08-19

作者简介:蔺海明(1953~), 男, 博士生, 研究员, 主要从事农业生态与旱地农业的教学与研究。

Foundation item: Sponsored by both “the light of the west project” from Chinese Academy of Science and the foundation for the Middle-young Scientists of Gansu Province (ZSPPI-A21-032)

Received date:2002-04-14; **Accepted date:**2002-08-19

Biography: LIN Hai-Ming, Doctor candidate, professor, Majoring in teaching and research of agriecology and dryland farming.

was set up with four treatments (0 mm, 22.5 mm 45.0 mm and 67.5 mm). The aid-to-irrigation was given at the jointing stage, booting stage and blooming stage of the spring wheat development. The experiment results showed that (1) the dynamic changes of soil water in wheat growth period were subjected to the variation of the quantity at precipitation, irrigation and water consumption. In general, water content in soil showed a decrease tendency. Micro-sprinkle-irrigation, especially at the irrigation level of 67.5 mm, significantly increased the water content in the upper layer of soil (0~40cm); (2) the effect of different irrigation methods on the wheat yield was not significant, however, the yield increase with the increase amount of irrigation. The highest yield appeared in the treatments irrigated 67.5mm by micro-sprinkle-irrigation. Irrigation led to increase of the ear number per hectare, and decrease of the grain number per ear and 1000 grain weight; (3) the WUE of treatments irrigated were higher than that of check (CK); the WUE and water irrigation efficiency (WIE) of micro-sprinkle-irrigation were highest among the three methods of irrigation; the WUE of the treatments irrigated 67.5mm was highest among the four levels of irrigation amount and the WIE of the treatments irrigated 45.0mm and 67.5mm were higher than other two levels of irrigation amount.

Key words: micro-irrigation; rainwater catchment; spring wheat; yield; water use efficiency; the Loess Plateau

文章编号:1000-0933(2003)03-0620-07 中图分类号:S512 文献标识码:A

以干旱而著称于世的黄土高原,历来是我国旱农研究的主要领域,以“主动抗旱”为思路的集水农业是近年来发展起来一种抗旱新途径^[1~3]。目前研究的重点放在集雨水的补灌制度的确定,尤其是旱地作物最佳补灌时期的确定,至今没有定论^[4~6]。由于影响干旱的因素不但有作物本身的特性,还包括复杂多变的各种气候因素和前期的土壤含水量等因素,从而导致了它的时空不一致,也导致了作物最佳补灌时期的不一致。据研究,在春小麦需水关键期春末夏初,黄土高原旱灾频繁^[7]。在不考虑土壤前期含水量的情况下,集雨水应灌在作物的需水关键期,春小麦以拔节期至灌浆期为宜,且越早越好;如果底墒不足,可用少量的水进行施水播种。本研究旨在利用不同的灌水设备进行集雨水的补灌,探讨对春小麦产量及水分效应的影响。

1 试验设计与方法

1.1 试验区基本概况

本试验设在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所皋兰生态与农业试验站。该试验站位于甘肃省皋兰县忠和乡崖川村,在地貌上处在黄土高原向内陆剥蚀高原过渡地区,是水蚀和风蚀的交错地带。受蒙古高压和青藏高原热力垂直作用的影响,降水偏少。年平均降水量为 263mm(1957~2000,皋兰县),降水的变率很大,70%的降雨分布在 6~9 月份。最大年降水量为 392.4mm,最小年降水量为 154.9mm,年降水量相对变率为 21.9%,旱灾频繁。此区在自然景观上处于由半干旱草原带向干旱荒漠草原带的急剧过渡区,海拔 1800m 左右。年平均气温为 7.1℃,最低气温为-9.1℃(1 月份),最高气温为 20.7℃(7 月份),≥0℃的年积温 3324.5℃。年潜在蒸发量(Potential evaporation)为 930.6mm,年水分亏缺量为 681.6mm。年平均日照时数为 2768.1h。本区地带性土壤为灰钙土,黄土母质,在中国土壤系统分类中为筒育犁型干旱土。土壤有机质含量 1.0%~1.1%,全氮 0.07%~0.09%,全钾 1.98%~2.10%,速效磷 7~10mg/kg,速效钾 120~160mg/kg。机械组成中粉砂粒占 60%左右,物理性粘粒只占 24%~35%,0~150cm 土壤容重 1.20g/cm³。

1.2 试验设计

本试验在 2001 年 3 月到 7 月进行,试验设灌水方式和灌水量两个因子。灌水方式设管灌、滴灌和微喷灌 3 个水平,灌水量设 0mm、22.5mm、45.0mm 和 67.5mm 4 个水平,3 次重复,条区试验设计,主处理为灌水方式,副处理为灌水量;主处理拉丁方排列,副处理随机排列,共 36 个小区。灌水处理在拔节期(5 月 27

日)、孕穗期(6月13日)和开花期(6月22日)分3次平均灌够所设的水量。小区面积 $3\times5\text{ m}^2$,行距20 cm, 每行播种400粒,每公顷保苗300万株。播种前每公顷施N 105kg, P_2O_5 75kg。每小区装有一个水表和阀门,便于计量和控制。滴灌小区间隔60cm 铺设一条滴灌带,每小区共5条。微喷灌每小区装有3个微喷头,间隔1m,每个微喷头与小区边的水平距离是1.5m。管灌小区人工手持PVC管灌水。每次灌水用潜水泵从贮水池抽水,水泵上装有过滤器,当灌溉小区少时,用过滤器上的阀门进行分流。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 降水量测定 在小麦生育期用量雨筒测定降水量。小麦生育期总共降雨99.1mm,其中 $\geq 3\text{ mm}$ 的降水83.6mm, $< 3\text{ mm}$ 的降水15.5mm。4、5、6和7月份的降水分别为31.3mm、8.8mm、28.0mm和31.0mm。

1.3.2 土壤水分监测 从小麦播种到收获每隔10d测定1次土壤水分,每小区选两个样点,取样深度1.2m,40cm以上隔10cm取1个样,40cm以下隔20cm取1个样。取样在第3重复进行。土壤水分测定用烘干法,样品用千分之一称重,做出小麦全生育期土壤水分变化动态曲线。

1.3.3 作物田间耗水量的计算 本文采用农田水分平衡法计算作物田间实际蒸散量ETa (Actual evapotranspiration)。由于试验区试验地平整、地下水位深、土层深厚及土壤质地均一,在试验区不产生深层渗漏、地下水补给和水分的水平运动^[9]。因此,适用于计算本试验的作物田间耗水量的农田水分平衡方程为:

$$ETa = P - V + I + \Delta W$$

式中, P 为生育期内降水量; V 为日降水量获一次降水量小于某一界限值时的无效降水量,本文指1次降水量 $< 3\text{ mm}$ 的降水; I 为农田灌水量; ΔW 为某一时段农田土壤贮水变化量。施成熙^[10]认为,当日(或一次)降水量在3mm左右时,其大致与作物对降水的截留量相等,故本文将小于3mm的日(或一次)降水量视为无效降水量。

1.3.4 作物产量及水分利用效率的计算 小麦出苗后,每小区选 1 m^2 的样方统计基本苗。在开花期选取同样大小的样方统计穗数。成熟后,单个小区去除边行后进行收获、脱粒和测产,并测出千粒重。每小区选20株进行室内考种,测量株高、有效分蘖、小穗数和穗粒数。对产量及其构成因素进行方差分析。结合产量、田间耗水量和补灌量计算出各处理的水分利用效率(WUE)和供水效率(WSE)。对产量及其构成因素进行多元线形回归方程和逐步回归方程拟合,分析各构成因素对产量的贡献率大小,确定对产量有显著影响的因子^[8]。

2 结果与分析

2.1 土壤水分变化动态

小麦生育期土壤水分变化动态,除灌水在上层土壤(0~40cm)引起两个峰值外,总体呈下降趋势,直到7月10日(图1和图2);上层(0~40cm)从5月1日到5月21日,下层(40~120cm)从5月1日到6月21日是下降最激烈的时期,这主要由于自5月起,随着气温的回升,田间的蒸腾蒸发上升,作物的耗水量剧增,而5月1日到6月21日的降水量只有16.6mm, $\geq 3\text{ mm}$ 的降水只有9mm;7月10日到收获略呈上升趋势,原因有两个:一是小麦在收获前蒸腾比较小;二是7月中下旬降雨多,7月中旬的降雨为24.2mm,从而使土壤含水量略微上升。另外,补灌对土壤水分的影响是暂时的,且只影响上层的土壤含水量;图1中的两个峰值是拔节期(5月27日)和开花期(6月22日)灌水而引起的,孕穗期(6月13日)灌水没有引起土壤水分的上升,主要由于灌水与土壤水分测定的间隔较长(8d);从图1的两个峰值上看,各处理的土壤含水量值以微喷灌67.5mm(S3)处理最高,其最高值分别为15.94%和12.56%;尤其是第一个峰值,S3处理明显高于其它处理,说明微喷灌67.5mm处理能显著地增加上层土壤含水量。

2.2 小麦产量及其构成因素分析

小麦收获后,对各小区的产量进行了方差分析,本试验的区组间、灌水量间和互作间的差异达极显著水平,而灌水与产量差异不显著;这是由于试验地的基础土壤含水量差异而造成的,本试验地第3重复的土壤基础含水量显著地低于其它两个重复。

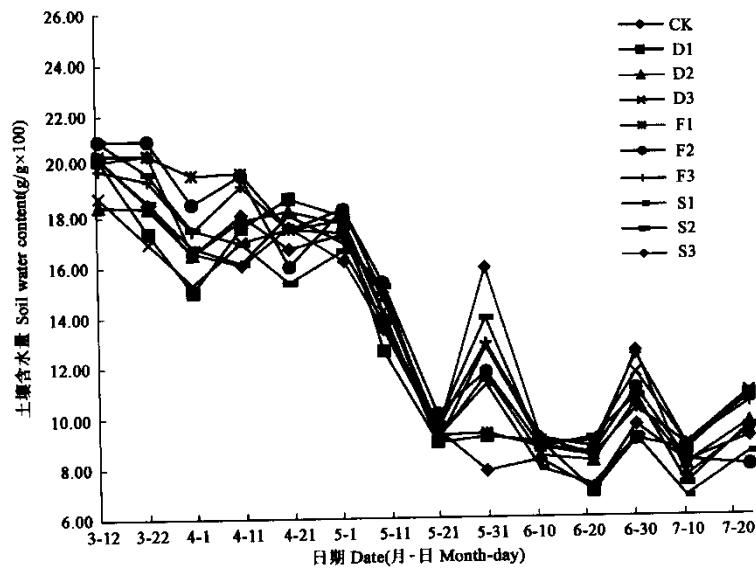


图 1 各处理 0~40cm 土壤水分变化动态

Fig. 1 The soil water dynamics in 0~40cm layer of various treatments

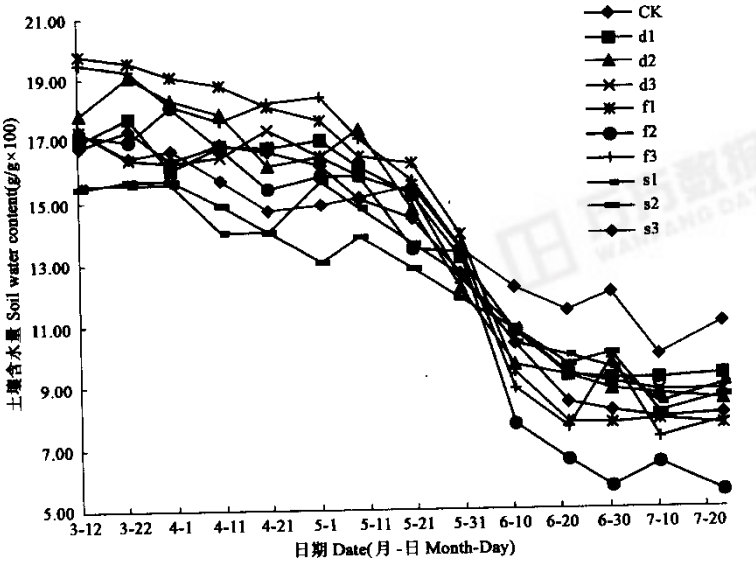


图 2 各处理 40~120cm 土壤水分变化动态

Fig. 2 The soil water dynamics in 40~120cm layer of various treatments

表 1 列出了本试验各处理的产量及其构成因素。灌水各处理的生物产量均高于对照,在灌溉方式水平上,滴灌、管灌和微喷灌处理比对照提高了耗水量,平均值分别为 48.8%、32.7%和 22.7%;在灌水量水平上,22.5mm、43.0mm 和 67.5mm 处理比对照提高了 3.6%、44.3%和 56.3%。灌水有增加公顷穗数,降低

穗粒数和千粒重的趋势,22.5mm、45.0mm 和 67.5mm 处理的公顷穗数比对照提高了 6.5%、9.0%和 25.9%。从产量表现看,各灌水处理的产量均显著地高于对照,在灌溉方式水平上,滴灌、管灌和微喷灌处理比对照分别提高了 36.5%、34.5%和 42.9%,其中以微喷灌的产量为最高;在灌水量水平上,22.5mm、45.0mm 和 67.5mm 处理比对照分别提高了 10.7%、42.8%和 60.2%,其中以 67.5mm 处理的产量为最高。

表 1 小麦产量及其构成因素

Table 1 The yield and components of yield of wheat										
项目 Item	CK ^①	D1	D2	D3	F1	F2	F3	S1	S2	S3
生物产量 Biomass (kg·hm ⁻²)	5351.4	5815.1	9294.5	8784.3	5963.1	7024.9	8317.3	4860	6849.1	7986.7
公顷穗数 Ear number per hectare (万穗·hm ⁻²)	298.6	359.2	338.3	365	305.8	316.7	374.2	289.2	321.7	388.3
穗粒数 Grain number per ear (粒·穗 ⁻¹)	24.3	23.9	22.1	22.1	25.5	23.7	22.3	21.4	27.1	23.3
千粒重 1000 grain weight(g)	37.28	37.08	36.44	36.5	36.61	36.5	37.09	36.25	35.99	34.75
经济产量 Grain yield (kg·hm ⁻²)	1084.4 e ^②	1144.4 de	1515.6 c	1780.0 ab	1262.2 d	1537.8 c	1571.1 bc	1195.6 de	1593.3 bc	1860.0 a

① CK 对照 Check,D1 滴灌 22.5mm Drip-irrigation 22.5mm,D2 滴灌 45.0mm Drip-irrigation 45.0mm,D3 滴灌 67.5mm Drip-irrigation 67.5mm,F1 管灌 22.5mm Pipe-irrigation 22.5mm,F2 管灌 45.0mm Pipe-irrigation 45.0mm,F3 管灌 67.5mm Pipe-irrigation 67.5mm,S1 微喷灌 22.5mm Micro-sprinkle-irrigation 22.5mm,S2 微喷灌 45.0mm Micro-sprinkle-irrigation 45.0mm,S3 微喷灌 67.5mm Micro-sprinkle-irrigation 67.5mm

② 同一行不同字母表示差异达到 5%显著水平 Mean values followed the same letters in a cullom are not significantly different at $p\leq0.05$

由于灌水方式间无显著差异,对灌水量在同一水平的各处理进行多元回归方程拟合,自变量因子有公顷穗数(X_1)、穗粒数(X_2)和千粒重(X_3),因变量为产量(Y),其结果见表 2。各因子系数的大小表示对产量贡献的多少,只有对照所拟合的多元回归方程达到显著水平。为剔除对方程不显著的因素,对各处理进行逐步回归分析,使入选的因子均达到显著水平,其结果表明:在对照中,千粒重对产量的贡献最大;22.5mm 处理,穗粒数对产量的贡献最大;45.0mm 处理,穗粒数和千粒重对产量的贡献都大;67.5mm 处理,公顷穗数对产量的贡献最大;从而说明,随灌水量的增加,千粒重对产量的贡献减小,而公顷穗数对产量的贡献增加,穗粒数对产量的贡献表现在这一过程之中。

2.3 小麦生育期水分利用情况

本试验的结果表明,随灌水量的增加小麦生育期的总耗水量增加,与灌水方式无明显的关系(表 3);总耗水量与生育期间的降水量、补灌量和土壤贮水变化量;土壤贮水变化量在 143.9mm~

表 2 小麦产量及其构成因素多云回归分析和逐步回归分析表

Table 2 Multiple and stepwise regression analysis on wheat yield and its components		
处理(mm) Treatments	多元回归方程 Multiple regression equation	F
CK	$Y = -0.476X_1 - 1.691X_2 + 88.523X_3 - 2032.758$	9.017*
22.5	$Y = 0.009X_1 + 26.838X_2 + 6.585X_3 + 330.408$	1.704
45.0	$Y = 3.798X_1 + 78.121X_2 + 97.144X_3 - 5225.363$	3.769
67.5	$Y = 3.816X_1 + 44.696X_2 - 1.916X_3 - 636.278$	2.475
逐步回归方程 Stepwise regression equation		F
CK	$Y = 85.509X_3 - 2103.618$	33.718**
22.5	$Y = 33.074X_2 + 420.193$	6.534*
45.0	$Y = 38.100X_2 + 83.34X_3 - 2392.474$	10.762*
67.5	$Y = 6.283X_1 - 624.456$	8.805*

* $p\leq0.05$, ** $p\leq0.01$

163.0mm 之间,说明灌水与否对土壤贮水的影响是很小的。补灌各处理的水分利用效率均高于对照,滴灌、管灌和微喷灌处理水分利用效率分别比对照提高 15.4%、13.5%和 22.3%,其中以微喷灌处理的水分利用效率最高;随灌水量的增加,其水分利用效率也增加,22.5mm、45.0mm 和 67.5mm 处理水分利用效率分别比对照提高 2.1%、20.5%和 28.6%。对供水效率的计算表明:滴灌、管灌和微喷灌处理的供水效率分别是 $7.52\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 、 $8.39\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 $9.25\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$,以微喷灌的供水效率最高;22.5mm、45.0mm 和 67.5mm 处理的供水效率分别是 $5.17\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 、 $10.32\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 $9.67\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$,以 45.0mm 和 67.5mm 处理的供水效率最高。

表 3 小麦生育期水分利用情况表

Table 3 Water utilization in spring wheat growth period

处 理 Treatments	有效降水量 Effective precipitation (mm)	补灌量 Irrigation quantity (mm)	土壤贮水变化量 Soil water change (mm)	总耗水量 Total water consumption (mm)	水分利用效率 Water use efficiency ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)	供水效率 Water supply efficiency ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)
CK*	83.6	0	156.3	239.9	4.53	/
D1	83.6	22.5	150.8	256.9	4.45	2.67
D2	83.6	45.0	163.0	291.6	5.20	9.58
D3	83.6	67.5	143.4	294.5	6.04	10.30
F1	83.6	22.5	156.8	262.9	4.80	7.90
F2	83.6	45.0	151.1	279.7	5.50	10.07
F3	83.6	67.5	155.4	306.5	5.13	7.21
S1	83.6	22.5	152.0	258.1	4.63	4.94
S2	83.6	45.0	151.9	280.5	5.68	11.31
S3	83.6	67.5	143.9	295.0	6.31	11.49

* 见表 1 See table 1

3 结论与讨论

3.1 旱地作物补灌灌溉制度的确定,与作物生育期的需水量、降水特性和土壤特性等有关,尤其是降水量决定了补灌量的大小;以甘肃省的“121”雨水集流工程为例,其基本内涵是每户人家建设 100m^2 的集流场,2 眼 $25\sim30\text{m}^3$ 的水窖,1 亩 (666.7m^2) 高效农田,由此可见,利用集蓄的雨水补灌作物最多不能超过 90mm;据尹光华和蔺海明等人^[4,5]在定西的集雨补灌春小麦试验表明,同样的水灌溉尽可能大的农田将能获得更高的水分利用效率 and 经济效益。因此,本试验在考虑到集蓄雨水代价较高和提供水分利用效率的基础上,所设计的灌水量都较低,而以微灌弥补其不足之处。

3.2 小麦生育期土壤水分变化动态受降水量、灌水量和小麦生育期耗水量的影响,总体呈下降趋势。微喷灌处理能显著地增加上层 ($0\sim40\text{cm}$) 土壤含水量,以微喷灌 67.5mm 处理最为明显。其它研究也表明,微喷灌能改善田间小气候,增加表层土壤含水量^[11~14]。

3.3 对产量的方差分析结果表明,尽管灌水方式间的差异不显著,但从产量表现来看,其大小顺序依次是微喷灌、滴灌、管灌和对照;灌水量和互作间的差异达极显著水平,随灌水量的增加,产量也增加,以微喷灌 67.5mm 产量最高。灌水有增加公顷穗数,降低穗粒数和千粒重的趋势。以公顷穗数、穗粒数和千粒重为自变量,产量为因变量进行多元回归和逐步回归分析表明,随灌水量的增加,千粒重对产量的贡献减小,而公顷穗数对产量的贡献增加,穗粒数对产量的贡献表现在这一过程之中。据尹光华等人(1998~1999)在定西的集雨补灌春小麦试验表明,随补灌量的增加,产量增加,同时穗粒数和千粒重也增加,而亩 (666.7m^2) 穗数减少^[4,5];这与本试验的结论有一定的出入,值得进一步研究。

3.4 作物田间耗水量是一个动态变量,因作物种类、降水年型等不同而异,并与生育期有效降水量呈显著正相关。本研究表明,作物田间耗水量和水分利用效率随补灌量的增加而增加;以微喷灌 67.5mm 的水分利用效率最高;供水效率以微喷灌 45.0mm 和 67.5mm 处理为高。

[1] Li F M, Wang J, Zhao S L. The rainwater harvesting technology approach for dryland agriculture in semi-arid Loess

Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(2): 259~264.

[2] Li F R. A strategic way for developing agricultural water conservancy in semiarid zone of China. *Research of Agricultural Modernization*, 1997, **18**(3): 166~170.

[3] Li F R, Zhao S L, Li F M, *et al.* Study on the water consumption law of complex crop systems in the tablelands of the eastern Gansu Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(4): 420~426.

[4] Lin H M, Niu J Y, Qin S H. Effect of supplementary irrigation of spring wheat and corn in semiarid area. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2001, **19**(4): 80~86.

[5] Yin G H, Lin H M. Initial research on yield-increasing mechanism of wheat supplementing irrigation with catchment rainfall in dryland field. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2001, **19**(2): 55~60.

[6] Wang Y, Cui M J, Fan T L, *et al.* Rainwater-collection irrigation of film-mulched winter wheat in dry plain. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1997, **15**(3): 57~63.

[7] Dong A Q, Cheng C M, Hao H L. Research on the agricultural moisture condition in Gansu Loess Plateau. *Arid Land Geography*, 1999, **22**(4): 8~15.

[8] Cheng S B. *Agricultural system engineering*. Lanzhou: Gansu Nationalities Press, 1990. 48~68.

[9] Yang W Z, Shao M A. *Study on soil moisture in Loess Plateau*. Beijing: Scientific Press, 2000. 86~114.

[10] Shi C X. *Land hydrology (preceding volume)*. Beijing: Scientific Press, 1959.

[11] Du Y D, Wang J, Liu Z X, *et al.* Water distribution and microclimatic effects of sprinkler irrigation on spring wheat field. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(3): 398~400.

[12] Li J S. Modeling crop yield as affected by uniformity of sprinkler irrigation system. *Agricultural Water Management*, 1998, **38**: 135~146.

[13] Li J S, Kawano H. The areal distribution of soil moisture under sprinkler irrigation. *Agricultural Water Management*. 1996, **32**: 29~26.

[14] Wang D, Shannon MC, Grieve CM, *et al.* Soil water and temperature regimes in drip and sprinkler irrigation, and implications to soybean emergence. *Agricultural Water Management*, 2000, **43**: 15~28.

参考文献:

[1] 李凤民, 王静, 赵松龄. 半干旱黄土高原集水高效旱发农业的发展. *生态学报*. 1999, **17**(1): 39~44.

[2] 李锋瑞, 赵松龄, 李凤民. 陇东黄土旱原作物组合系统农田耗水规律研究. *生态学报*. 1995, **15**(4): 420~426.

[3] 李锋瑞. 集雨节灌-半干旱区农业水利化建设的战略途径. *农业现代化研究*, 1997, **18**(3): 166~170.

[4] 蔺海明, 牛俊义, 秦舒浩. 陇中半干旱区小麦和玉米补灌效应研究. *干旱地区农业研究*, 2001, **19**(4): 80~86.

[5] 尹光华, 蔺海明. 旱地小麦集雨补灌增产机制初探. *干旱地区农业研究*, 2001, **19**(2): 55~60.

[6] 王勇, 崔明九, 樊廷录. 时原地膜冬小麦集雨节水灌溉研究. *干旱地区农业研究*, 1997, **15**(3): 57~63.

[7] 董安祥, 陈昌敏, 郝惠玲. 黄土高原农业水分分布研究. *干旱区地理*, 1999, **22**(4): 8~15.

[8] 陈士宾. *农业系统工程*. 兰州: 甘肃民族出版社, 1990, 48~68.

[9] 杨文治, 邵明安. *黄土高原土壤水分研究*. 北京: 科技出版社, 2000, 86~114.

[10] 施成熙. *陆地水文学*. 北京: 科技出版社, 1959.

[11] 杜尧东, 王健, 刘作兴. 春小麦田喷灌的水量分布及小气候应用. *应用生态学报*, 2001, **12**(3): 398~400.